

## АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ЭФФЕКТИВНЫХ СРЕД ДЛЯ ОЦЕНКИ УПРУГИХ СВОЙСТВ СИЛЬВИНИТА ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

И. А. Пантелеев<sup>1</sup>\*, А. А. Барях<sup>2</sup>, Д. В. Ложкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

\*E-mail: pia@icmm.ru

Настоящая работа посвящена комплексному анализу деформационных характеристик и интегральных параметров микротрещиноватости в образцах красного сильвинита Верхнекамского месторождения солей при циклическом одноосном сжатии с постепенным увеличением максимальной нагрузки от цикла к циклу. Для оценки плотности и объёмной доли микротрещин до испытаний и после каждого цикла осуществлялась микротомографическая съёмка образцов на рентгеновском томографе Skyscan 1272 Bruker. Пространственное разрешение томографических изображений (размер ребра вокселя) составило 12 мкм. В результате анализа кривых деформирования установлена зависимость нормированного касательного модуля деформации красного сильвинита от величины максимальной нагрузки в цикле.

Анализ КТ данных показал, что объёмная доля микротрещин с величиной максимальной нагрузки в цикле растёт нелинейно, заметные изменения имеют место после нагрузки 10 МПа. Средняя объёмная плотность микротрещин после завершения испытаний составляет 1.6%. Показано, что изменение среднего нормированного касательного модуля деформации красного сильвинита линейно связано с изменением средней объёмной доли микротрещин. Для оценки плотности микротрещин по КТ данным как интегрального параметра, широко используемого в теории эффективных сред, предложено два подхода. Первый подход базируется на определении плотности микротрещин через их максимальный размер, второй – на определении плотности микротрещин через радиус монетообразных трещин эквивалентного объёма и площади поверхности. Показано, что до максимальной нагрузки 10 МПа оба подхода дают незначительный рост плотности микротрещин. Далее, плотность микротрещин, оцененная по первому способу, возрастает квазилинейно с ростом максимальной нагрузки в цикле, а плотность микротрещин, оцененная по второму способу – нелинейно.

Экспериментальные данные по изменению среднего нормированного касательного модуля деформации красного сильвинита и интегральных характеристик микротрещиноватости были использованы для верификации и сравнительного анализа различных методов теории эффективных сред. Построены зависимости нормированного эффективного модуля Юнга от максимальной нагрузки в цикле с использованием методов Мори–Танака, дифференциального метода эффективной среды и метода самосогласования. Установлено, что дифференциальный метод эффективной среды и метод самосогласования с оценкой плотности трещин по первому способу дают заниженные оценки среднего эффективного нормированного модуля Юнга, начиная уже с умеренных нагрузок, а метод Мори–Танака – завышенные оценки. Показано, что самосогласованный метод с оценкой плотности микротрещин через радиус эквивалентных монетообразных трещин даёт приемлемые оценки эффективного нормированного модуля Юнга (погрешность для средних величин не превышает 10%) для плотности микротрещин не превышающей 0.5.

Полученные результаты могут быть использованы при определении несущей способности ленточных и столбчатых целиков в части развития техногенной нарушенности, что позволит более достоверно оценивать их устойчивость. Установлен порог максимальной действующей нагрузки (10 МПа) после которого активизируется процесс неупругого деформирования соляных междукамерных целиков. Вопрос о влиянии формы образцов, масштабного фактора и вида напряженно-деформированного состояния на полученные результаты остается открытым и является предметом дальнейших исследований.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда  
(проект № 26-97-20006).*

## APPLICATION OF EFFECTIVE MEDIUM THEORY METHODS FOR ESTIMATING THE ELASTIC PROPERTIES OF SYLVINITE BASED ON X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY DATA

I. A. Panteleev<sup>1,\*</sup>, A. A. Baryakh<sup>2</sup>, D. V. Lozhkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Continuum Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia*

<sup>2</sup>*Mining institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia*

\*E-mail: pia@icmm.ru

This work is devoted to a comprehensive analysis of the deformation characteristics and integral parameters of microcracking in samples of red silvinitite from the Verkhnekamsk salt deposit under cyclic uniaxial compression with a gradual increase in maximum load from cycle to cycle. To assess the density and volume fraction of microcracks before testing and after each cycle, microtomography of samples was performed using a Skyscan 1272 Bruker X-ray tomograph. The spatial resolution of the tomographic images (voxel edge size) was 12 microns.

The analysis of CT data showed that the volume fraction of microcracks with the maximum load in the cycle increases non-linearly, noticeable changes occur after a load of 10 MPa. The average volume density of microcracks after completion of the tests is 1.6%. It is shown that the change in the average normalized tangential modulus of deformation of red silvinitite is linearly related to the change in the average volume fraction of microcracks. Two approaches have been proposed to estimate microcrack density from CT data as an integral parameter widely used in the theory of effective media. The first approach is based on determining the density of microcracks through their maximum size, the second is based on determining the density of microcracks through the radius of coin-shaped cracks of equivalent volume and surface area. It is shown that up to a maximum load of 10 MPa, both approaches result in a slight increase in microcrack density. Further, the microcrack density estimated by the first method increases quasi-linearly with increasing maximum load in the cycle, and the microcrack density estimated by the second method increases non-linearly.

Experimental data on the change in the average normalized tangential modulus of deformation of red silvinitite and the integral characteristics of microcracking were used for verification and comparative analysis of various methods of the theory of effective media. The dependences of the normalized effective Young's modulus on the maximum load in the cycle are constructed using the Mori-Tanaka methods, the differential effective medium method, and the self-consistency method. It has been found that the differential effective medium method and the self-consistency method with the crack density estimate using the first method give underestimated estimates of the average effective normalized Young's modulus, starting with moderate loads, and the Mori-Tanaka method overestimate estimates. It is shown that a self-consistent method with estimating the microcrack density through the radius of equivalent coin-shaped cracks provides acceptable estimates of the effective normalized Young's modulus (the error for average values does not exceed 10%) for microcrack densities not exceeding 0.5.

The results obtained can be used to determine the bearing capacity of ribbon and columnar pillars in terms of the development of anthropogenic disturbance, which will allow for a more reliable assessment of their stability.